砷离子在云南红土中的迁移研究

◆ 刘鹏 著

WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

砷离子在云南红土中的迁移研究

刘鹏　著

WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

砷离子在云南红土中的迁移研究/刘鹏著. —武汉:武汉大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-307-16554-0

Ⅰ.砷… Ⅱ.刘… Ⅲ.地下水污染—研究—云南省 Ⅳ.X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 196686 号

责任编辑:蔡 巍 责任校对:王小倩 装帧设计:吴 极

出版发行:**武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:7 字数:112 千字

版次:2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-16554-0 定价:38.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前　言

本书在明确了污染物的危害及资源化利用的基础上，分析了目前污染物的研究现状，针对存在的问题，提出研究地下水中砷离子的迁移规律。主要开展了地下水中砷离子的迁移机理、迁移模型、简化求解、模型参数、模型应用、迁移规律及迁移试验等方面的研究工作。取得的研究成果对于有效防治污染物的排放所带来的环境污染问题具有较重要的理论指导意义和现实意义。

砷离子经雨水的淋溶作用，到达地下水中，随地下水一起运动，发生扩散和迁移，污染地下水环境。地下水中砷离子的迁移主要受到砷离子自身的性质、温度及土壤的性质等几个方面的综合影响。砷离子的迁移机理可以从砷离子自身的迁移、温度影响下的迁移及土壤影响下的迁移等几个方面的相互作用来进行阐释。其中，砷离子自身的迁移需要考虑对流弥散作用和源汇作用两个方面，温度对砷离子迁移的影响需要考虑分子扩散作用和补给作用两个方面，土壤的性质对砷离子迁移的影响主要考虑土颗粒的性质、土壤的 pH 值、含水性及渗透性四个方面。

在明确了地下水中砷离子迁移机理的基础上，运用地下水动力学等理论，根据质量守恒定律、达西定律及热量平衡原理，分析地下土壤微分单元体中的温度变化、水量变化、水流流速变化及浓度变化，分别建立水温迁移方程、水流连续方程、水流运动方程和污染物迁移方程。通过对这几个方程的耦合，最终建立是否考虑温度影响的地下水中砷离子的两个迁移模型。考虑温度条件下的迁移模型比不考虑温度条件下的迁移模型多了一个水温迁移方程。

为了求解迁移模型，对模型进行了假定简化，得到是否考虑温度影响和源汇项影响的砷离子的三个简化迁移模型。迁移模型的简化主要是模型参数的简化，简化后的三个迁移模型所包含的五个模型参数可以根据经验法和试验法进行确定。针对迁移模型的求解，提出了模型模拟区域的确定原则，给出了模型的初始条件和边界条件，明确了模型的求解过程。

选用 Femlab 软件对简化后的三个迁移模型进行求解。编制了迁移模型的求解流程图，说明了具体的求解过程。根据确定的迁移模型计算参数，分别求解出三个简化迁移模型的浓度随时间和空间的分布情况。迁移模型计算结果表明：不管是否考虑温度和源汇项的影响，地下水中砷离子的迁移规律是污染物的浓度和污染的范围都随着时间的推移而呈现逐渐增大的趋势。相同条件下，考虑温度时砷离子的迁移加快；而源汇项对砷离子浓度的影响取决于源汇作用的结果。

为了分析模型计算结果的合理性，进行了不同击实功、不同含水率、不同温度影响下污染红土中砷离子的迁移试验研究。试验结果表明：击实功越小，含水率越大，温度越高，红土中砷离子的迁移越快，溶液中砷离子的浓度越高；随着时间的延长，溶液中砷离子的浓度逐渐增大，红土中砷离子的浓度逐渐减少。迁移试验结果呈现出与迁移模型计算结果相同的变化趋势。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正！

著　者

2015 年 5 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

Preface

The study of pollutant transference regularity in groundwater is raised direct open question, based on imperil and resources utilization and analyses the research actuality of pollutant. The research arsenic in groundwater work is developed from transference mechanism, transference model, predilection solve, model parameter, model application, transference regularity transference test and so on. The acquisitive research production has major theory supervision and realization sense for effective prevention the environmental pollution regime discharge of discharge the pollutant.

The arsenic occur diffuse and transplant and pollute groundwater environment by rainwater eluviation arrive groundwater follow movement together. The combined influence of the groundwater transference of arsenic mostly came in for arsenic personal property, temperature, soil property and so on. The interaction came explanation of the arsenic transference mechanism could from arsenic personal transference, temperature and soil influence transference and so on. The arsenic personal transference consider convection-dispersion action and source-sink action two aspect, water temperature towards arsenic transference infection consider molecular diffusion action and alimentation two aspect, soil property towards arsenic transference infection consider soil granulation property, pH, aqueous and penetrability four aspect.

The water temperature transference equation, current continuity equation, current motion equation and arsenic transference equation are established, based arsenic transference mechanism in groundwater, used groundwater dynamics theory, evidenced law of conservation of mass, Darcy's law and heat balance theory, analyzed temperature fluctuation, water flow fluctuation, current velocity fluctuation and concentration fluctuation in subsurface soil differential element. Finally, the arsenic two transference model in groundwater whether considers temperature influ-

ences are established through coupling these several equation. Take temperature conditions transference model ratio take no account of with the addition of water temperature transference equation into consideration.

The three predilection transference models of arsenic are obtained whether consider temperature and source-sink influence through presumption and predilection in order to solve transference model. The predilection of the transplant model predigests the model parameter primarily, and the five model parameter could determine according to experience and test method in three predilection transference models of arsenic. direct the transference model solve, bring up the determine principle of modeling regional, give out the model initial and boundary conditions and definitude the model solving process.

The solving flow chart of transference model is established and the specific solving process is illustrated. The three predilection transference models of arsenic solve out the arsenic concentration with space-time distribution of fiber length according to calculating parameter. The result shows that arsenic transference regularity in groundwater present out concentration and region of arsenic in company with time prolong whereas crescent trend. Take temperature transference of arsenic expedite into consideration, whereas source-sink towards arsenic concentration infection rest with the result of source-sink action in identical conditions.

The research of pollute laterite transference test for As is proceed in different compaction power, water content, temperature infection in order to analyse the rationality of model result. The test result shows that the faster transference of arsenic in laterite, concentration of arsenic went over high in solution, when the compaction power went over smallness, water content went over large, and temperature went over high. With the time prolong, concentration of pollutant building up in solution, concentration of pollutant taper in laterite. The result of transference test and model calculation present out the same change trend.

Because of the limited level and hasty time, deficiencies unavoidably exist in the book. Please point and give directions to me.

Compiler

2015.5

目　录

1　绪论 …… (1)
1.1　引言 …… (1)
1.2　污染物的危害 …… (3)
1.2.1　粉煤灰的危害 …… (3)
1.2.2　石油和重金属物质的危害 …… (5)
1.2.3　化肥和农药的危害 …… (5)
1.2.4　生活垃圾的危害 …… (5)
1.2.5　煤矸石的危害 …… (6)
1.3　污染物的资源化利用 …… (6)
1.3.1　粉煤灰的资源化利用 …… (6)
1.3.2　石油和重金属物质的资源化利用 …… (8)
1.3.3　化肥和农药的资源化利用 …… (8)
1.3.4　生活垃圾的资源化利用 …… (9)
1.3.5　煤矸石的资源化利用 …… (9)
1.4　污染物的研究现状 …… (9)
1.4.1　试验研究方面 …… (9)
1.4.2　理论研究方面 …… (11)
1.4.3　数值模拟研究方面 …… (12)
1.4.4　环境评估方面 …… (13)
1.5　目前污染物研究存在的问题 …… (14)
1.6　问题的提出 …… (14)
1.7　本书研究的主要内容及意义 …… (15)
1.7.1　本书研究的主要内容 …… (15)
1.7.2　本书研究的意义 …… (16)
1.8　本书的组织编排 …… (17)
1.9　本章小结 …… (17)

2 地下水中污染物迁移机理的研究……（18）
2.1 引言……（18）
2.2 污染物的淋溶过程……（18）
2.3 影响地下水中污染物迁移的因素……（19）
2.4 污染物自身迁移机理……（20）
2.4.1 对流弥散作用……（20）
2.4.2 源汇作用……（22）
2.5 水温影响污染物的迁移机理……（25）
2.5.1 分子扩散作用……（26）
2.5.2 补给作用……（27）
2.6 土壤的性质影响污染物的迁移机理……（27）
2.6.1 土颗粒性质……（27）
2.6.2 土壤 pH 值……（27）
2.6.3 土壤含水率……（28）
2.6.4 土壤渗透性……（28）
2.7 本章小结……（28）
3 地下水中污染物迁移模型的建立……（30）
3.1 引言……（30）
3.2 不考虑温度影响的污染物迁移模型的建立……（30）
3.2.1 地下水中水流连续方程(一)……（30）
3.2.2 地下水中水流运动方程……（31）
3.2.3 地下水中污染物迁移方程(一)……（32）
3.2.4 不考虑温度影响的污染物迁移模型……（35）
3.3 考虑温度影响的污染物迁移模型的建立……（36）
3.3.1 地下水中水温迁移方程……（36）
3.3.2 考虑温度影响的达西定律……（38）
3.3.3 地下水中水流连续方程(二)……（38）
3.3.4 地下水中污染物迁移方程(二)……（39）
3.3.5 考虑温度影响的污染物迁移模型……（39）
3.4 本章小结……（40）

4 地下水中污染物迁移模型的简化求解及模型参数的确定 …… (41)
4.1 引言 …… (41)
4.2 污染物迁移模型的假定 …… (41)
4.3 污染物迁移模型的简化 …… (42)
4.3.1 不考虑温度影响的污染物迁移模型的简化 …… (42)
4.3.2 考虑温度影响的污染物迁移模型的简化 …… (44)
4.4 简化前后迁移模型对比 …… (45)
4.5 污染物迁移模型参数的确定 …… (46)
4.5.1 迁移模型参数的经验公式法确定 …… (47)
4.5.2 迁移模型参数的试验法确定 …… (47)
4.6 污染物迁移模型的求解 …… (50)
4.6.1 不考虑温度条件下污染物迁移模型的求解 …… (50)
4.6.2 考虑温度条件下污染物迁移模型求解 …… (52)
4.7 本章小结 …… (54)
5 地下水中污染物迁移模型的应用及迁移规律的研究 …… (55)
5.1 引言 …… (55)
5.2 Femlab 求解过程 …… (55)
5.2.1 Femlab 简介 …… (55)
5.2.2 污染物迁移模型的 Femlab 求解流程 …… (55)
5.2.3 污染物迁移模型的 Femlab 求解过程 …… (56)
5.3 污染物迁移模型的应用 …… (62)
5.3.1 计算参数取值 …… (62)
5.3.2 不考虑温度影响的污染物的浓度分布 …… (63)
5.3.3 考虑温度影响的污染物的浓度分布 …… (70)
5.4 地下水中污染物的迁移规律研究 …… (73)
5.5 本章小结 …… (74)
6 红土中砷离子的迁移试验研究 …… (75)
6.1 引言 …… (75)
6.2 试验方案的拟订 …… (75)
6.2.1 试验目的 …… (75)
6.2.2 试验土样的选取 …… (76)

6.2.3 试验方案……（76）
6.3 砷离子试样的制备……（78）
6.3.1 击实试样的制备……（78）
6.3.2 浸泡试样的制备……（78）
6.3.3 砷离子溶液的提取……（79）
6.4 溶液中砷离子浓度测试结果及分析……（80）
6.5 红土中砷离子的迁移变化特性……（81）
6.5.1 击实功对砷离子浓度的影响……（81）
6.5.2 含水率对砷离子浓度的影响……（82）
6.5.3 温度对砷离子浓度的影响……（83）
6.5.4 红土中砷离子的浓度变化特性……（84）
6.6 试验结果与迁移模型计算结果对比……（84）
6.7 本章小结……（86）
7 主要研究结论及存在的问题……（87）
7.1 主要工作……（87）
7.2 主要研究结论……（88）
7.3 存在的问题……（90）
附录 符号说明 ……（92）
参考文献 ……（94）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

1 绪　论

1.1 引言

随着城市化进程和工业经济的迅速发展，来自各个方面的污染物越来越多，其污染程度也越来越严重。通常所说的污染物是指生产及生活过程中产生的三废污染物（废气、废液、废渣），这些污染物主要包括火电厂发电产生的固体废弃物[如粉煤灰（图 1-1）、煤矸石（图 1-2）]，工厂、造纸厂、冶炼厂等生产过程的原料泄露（如石油、重金属物质）和在生产中产生的附带废弃物（如污水、有毒有害气体），农业上的化肥和农药，生活中的生活垃圾（图 1-3）和废弃物等。这些有毒有害的污染物只要排放出来，就会对周围环境造成一定的影响。

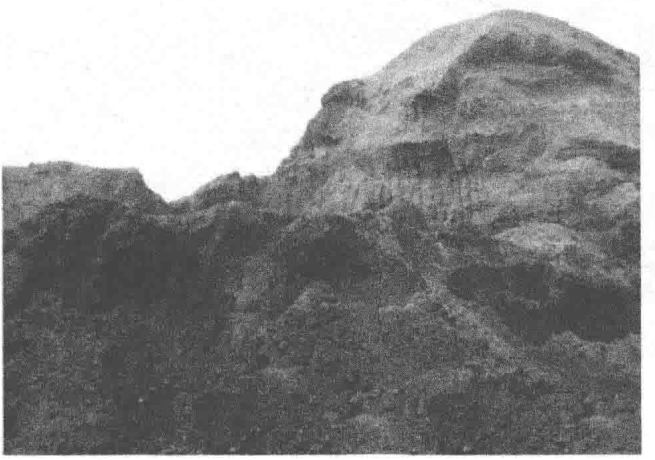

图 1-1　粉煤灰堆积图

污染物中常见的微量元素有：氮（N）、氟（F）、氯（Cl）、磷（P）、钙（Ca）、汞（Hg）、砷（As）、铅（Pb）、铜（Cu）、铬（Cr）、铁（Fe）、铀（U）、硒（Se）、镉（Cd）、钴（Co）、锰（Mn）等，不同的污染物其微量元素的种类和含量都不相

图 1-2　煤矸石堆积图

图 1-3　生活垃圾堆积图

同，工厂、造纸厂、冶炼厂等在生产过程泄露出来的石油、重金属物质，其重金属（汞、砷、铅、铜、铬、锰等）和有机物含量较大；生活垃圾中有机污染物较多，重金属含量较少；农业上的化肥和农药中主要含氮、磷、钙等微量元素和无机污染物较多；粉煤灰和煤矸石中基本上都含有上述微量元素，某些火电厂排放出来的粉煤灰中还可能含有少量的放射性元素。

这些微量元素中，以氟、汞、砷、铅、铬、铀、硒等元素的危害性最大，只要污染物中含有此类微量元素，就会对地下水和人体造成危害；而像铜、砷、锰等微量元素，其危害相对来说要小一些，通常情况下不会对人体造成危害，只有在含量超过国家饮用水标准时才会对人体造成较大的危害；而像氮、氯、磷、钙等微量元素一般不会直接对人体造成危害，这类微量元素主要是通过影响周围环境和动植物的生长，最终影响人体。

对于水利水电工程来说，电力部门发电产生的固体废弃物的影响较大，其中火力发电厂产生的固体垃圾量较大，在固体垃圾中以粉煤灰所占的比例最大。粉煤灰是火力发电厂煤炭燃烧过程中遗留下来的未充分燃烧的物质，主要包括从烟筒排出的飞灰、除尘器中排出的细灰和燃烧炉中排出的灰渣。

随着我国经济建设的迅速发展，各行业对电力和生活质量的需求不断扩大，导致粉煤灰的排放量不断增加。由于粉煤灰中含有大量的有害污染物，淋溶则是使污染物从粉煤灰中析出的主要途径之一。粉煤灰及其燃烧（自燃）的产物（灰渣）在地面上贮存的过程中，由于水的淋溶和其他介质的作用，一定量的污染物会从中析出并进入土壤，污染土壤。污染物中还有许多金属微量元素，这些金属微量元素与一般污染物不同，它们在土壤中不易随水迁移，不能被土壤微生物分解；相反土壤微生物可以富集这些金属微量元素，使这些金属微量元素在土壤中积累，转化为毒性更大的化合物，从而对土壤产生破坏和影响。当土壤层达到饱和以后，这些污染物会随水一起继续运动，进入地下水，污染地下水。

1.2 污染物的危害

由于污染物的种类较多，不同污染物对于周围环境的污染程度不同，因此，有必要分析各种不同污染物对周围环境的危害情况。

1.2.1 粉煤灰的危害

粉煤灰中含有大量有毒有害污染物，当这些污染物通过外界条件的作用进入大气、土壤和水体当中后，就会对当地的环境造成影响。总体来说，粉煤灰的危害可以概括为以下四个方面。

(1) 污染大气

随着火力发电厂的不断投入使用，大量的煤炭被燃烧以后，会排出许多污染气体，使得电厂及其周围的空气污染日趋严重，粉煤灰堆积物就是严重的空气污染源。因为粉煤灰在运输、堆放过程中，会形成一种粉尘颗粒，颗粒悬浮于大气中会破坏大气的温室效应，使气候出现异常。当粉煤灰的含硫量较大时，在加压、吸热和通风的条件下，会发生自燃，释放出大量的二氧化硫、二氧化碳、一氧化碳、硫化氢气体及一定量的氮氢化合物等有毒有害物质，从而污染周围的环境。

(2) 污染水体

粉煤灰在露天堆放过程中，经降水淋溶后，部分物质会被溶解，并随降水形成地表径流进入水体，污染水源，当人饮用时，其中的重金属污染物会危害人体健康；长期经受这种污染，水源水质会逐渐酸化，当被用来养殖时，会造成鱼类和其他淡水生物死亡，破坏生态环境。

(3) 污染农田

粉煤灰对农田的破坏主要是粉煤灰的风蚀扬尘，使得一些细小的颗粒悬浮于大气中，向粉煤灰堆积物周围区域降落。当粉煤灰受冲刷时，粉煤灰中的污染物会随降水形成地表径流进入土壤，破坏土壤中重金属的本底值和平衡关系，同时破坏土壤的养分，并对土壤中微生物的活动产生影响。这些有害成分的存在，不仅阻碍植物根系的发育和生长，还会在植物有机体内积蓄，通过食物链危及人体健康。

(4) 危害人身安全

一般粉煤灰所含的灰分为 70%～80%，发热量为 3350～6280 J，硫含量较高，粉煤灰堆积后由于内部发热，温度升高(可达 800～1200 ℃)，很容易在内部形成一个高温、高压的环境，从而使得粉煤灰发生酸化、爆炸、滑坡和辐射作用，危害人身安全。

① 扬尘。

粉煤灰在运输、堆放过程中，会形成一种粉尘颗粒，在风速较大时，颗粒就会扬尘并悬浮于大气中，粉尘中含有很多对人体有害的元素，如汞、铬、镉、砷等，颗粒小的会被人体吸入肺部，导致如气管炎、肺气肿、尘肺等疾病，更严重的还能导致癌症的发生。颗粒大的进入眼、鼻，引起感染，危及人体健康。

② 酸化。

粉煤灰自燃时会释放出大量 SO_2、NO_x 气体，这些气体在空气中氧化，并溶解在雨水中，随雨水降落到地面，即为酸雨。酸雨会使土壤发生酸化，影响农作物生长，酸雨也会腐蚀人的皮肤，从而危及人体健康。

③ 爆炸。

当粉煤灰堆积物内部温度和压力达到一定程度时就会发生爆炸，我国曾多次发生电厂粉煤灰堆积物爆炸事故，造成人员伤亡。

④ 滑坡。

粉煤灰堆积物在轻微爆炸或受地下开采影响时，经常发生滑坡事故，破坏当地的土地资源，严重地影响当地居民的人身安全。

⑤ 辐射。

粉煤灰在运输、堆放等过程中，由于逐渐破碎，裸露面积逐渐增大，从而扩大了与空气接触的面积，其中的放射性元素向空气中大量析出，使空气中的放射性元素浓度增大，超过其本底值，便造成辐射污染。例如，对人体危害最大的氡(Rn)，它是导致矿工肺癌的主要原因之一。

除了粉煤灰以外，其他污染物对周围环境和人体的危害也很大。

1.2.2 石油和重金属物质的危害

工厂、造纸厂、冶炼厂等生产过程中泄露出来的石油和重金属物质主要是污染水源。这些污染物经降水淋溶后，部分物质会被溶解，并随降水形成地表径流进入水体污染水源，当人饮用时，其中的重金属污染物会危害人体健康。

1.2.3 化肥和农药的危害

农业上的化肥和农药主要是污染水源和大气，化肥和农药对于土壤的污染也很大，会影响原本适合庄稼生长的土壤，破坏土壤中重金属的本底值和平衡关系，同时会破坏土壤中的养分，使得土壤不利于庄稼的生长。化肥和农药还会污染周围动植物，最终影响人体的健康。

1.2.4 生活垃圾的危害

生活垃圾长期堆放在一个地方，会对周围的大气、水体和土壤造成影

响，另外，垃圾中的渗滤液也会通过降雨淋溶作用进入土壤和地下水中，污染土壤和地下水。

1.2.5 煤矸石的危害

同为火力发电厂发电产生的固体废弃物的煤矸石，其微量元素的成分和化学性质与粉煤灰类似，煤矸石的危害也与粉煤灰类似，煤矸石长期堆放在电厂周围，会污染周围的大气；通过降雨淋溶作用，其中的污染物会进入土壤和地下水中，污染土壤和地下水；煤矸石同样也会发生酸化、爆炸、滑坡和辐射作用，危害人身安全。

总之，污染物对我们的生活影响巨大。一方面，污染物对于自然环境和人身有着巨大的危害性；另一方面，随着科学技术的迅速发展，人们在对于这些污染物的认识越来越深刻的同时，开始着手还能对污染物资源再利用。

1.3 污染物的资源化利用

污染物的危害是巨大的，但是随着科学技术的不断进步和发展，近年来随着国际性能源供需矛盾的加剧和对环境保护越来越高的要求，已经逐渐引起了世界各国的关注，对其进行了广泛的研究，取得了一定的研究成果，并已在实际中得到应用。

1.3.1 粉煤灰的资源化利用

随着国民经济的不断发展，粉煤灰的危害已经逐渐引起人们的认识，在进行煤炭开采和电厂火力发电的同时，粉煤灰资源化的利用也已经逐渐成熟。粉煤灰资源化的利用主要表现在以下五个方面。

(1) 利用粉煤灰发电

一般粉煤灰所含的灰分为70%～80%。粉煤灰可以燃烧，通过一定条件的筛选可以选出燃烧值较好的粉煤灰，并掺入煤炭中燃烧发电，一方面可以节约用煤，另一方面又可以消耗粉煤灰。利用粉煤灰发电是粉煤灰综合利用社会、环境、经济效益相统一的最有效途径，也是煤矿发展粉煤灰综合利用的重中之重，并已形成了一定规模。如阳泉煤业集团始终坚持“煤与非

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com